

Additive Fertigung mittels Electron Beam Melting (EBM): vom Pulver bis zu Anwendungen in der Mobilität

Burghardt Klöden, Alexander Kirchner, Silvia Vock, Marie Jurisch, Michael Süß, Christine Schöne, Thomas Weißgärber, Bernd Kieback, Ralph Stelzer*

1. Einleitung

1.1 Technologie

Das selektive Elektronenstrahlschmelzen (engl. Electron Beam Melting (EBM[®])) ist ein pulverbettbasiertes additives Fertigungsverfahren, mit dessen Hilfe metallische Bauteile schichtweise hergestellt werden können. Der schematische Aufbau einer entsprechenden Anlage ist in **Bild 1** dargestellt. Dabei erfolgt die Strahlerzeugung im Bereich 1. Der Kopf der Elektronenquelle beinhaltet die Glühkathode und den Wehneltzylinder zur Steuerung des Strahlstromes. Das geheizte Filament besteht entweder aus Wolfram oder bei den neuesten Systemen aus einkristallinem LaB₆. Gegenüber steht die Kupferanode mit mittigem Loch. Die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode beträgt 60 kV. Die Strahlablenkung durch ein elektromagnetisches Linsensystem erfolgt im Bereich 2. Von oben kommend passiert der Elektronenstrahl zuerst die Astigmatorlinsen. Diese dienen der Anpassung der Brennweite in verschiedenen Richtungen, wodurch kreisförmige Brennflecke überall in der Bauebene entstehen. Es folgen die Fokusslinse und schließlich die Ablenkspulen, die die Bewegung des Strahles in x- und y-Richtung erzeugen. Der Bereich 3 ist die eigentliche Baukammer. In ihr befindet sich der Bautank mit der in z-Richtung verfahrbaren Bauplattform. Die Pulverzufuhr wird aus Vorratsbehältern mit 40 bis 100 l Volumen über ein Rakelsystem gewährleistet. Durch einen Käfig mit konfigurierbaren Hitzeschilden wird der Wärmeverlust durch Abstrahlung begrenzt.

Die wesentlichen Eigenschaften des Verfahrens sind folgende:

- Der Elektronenstrahl wird sowohl für das selektive Aufschmelzen als auch das Vorheizen des Pulverbetts genutzt. Aufgrund der hohen Energiedichte kann ein weiter Bereich von Werkstoffen (z.B. Ti- und Ni-Basis, Refraktärmetalle) prinzipiell voll verdichtet werden. Weiterhin kann aufgrund der Vorheizung eine werkstoffspezifische erhöhte Temperatur im Bauraum eingestellt werden, was z.B. bei der Reduktion thermischer Spannungen vorteilhaft sein kann.
- Die Prozessatmosphäre ist Vakuum. Einerseits ist dies Voraussetzung für den Betrieb des Elektronenstrahls, andererseits lassen sich dadurch insbesondere hoch reaktive Werkstoffe verarbeiten, und weiterhin sorgt das Vakuum für einen hohen Grad an thermischer Isolation.
- Die Strahlablenkung erfolgt trägheitsfrei, wodurch vergleichsweise hohe Scangeschwindigkeiten und Bauraten [1] erreicht werden.

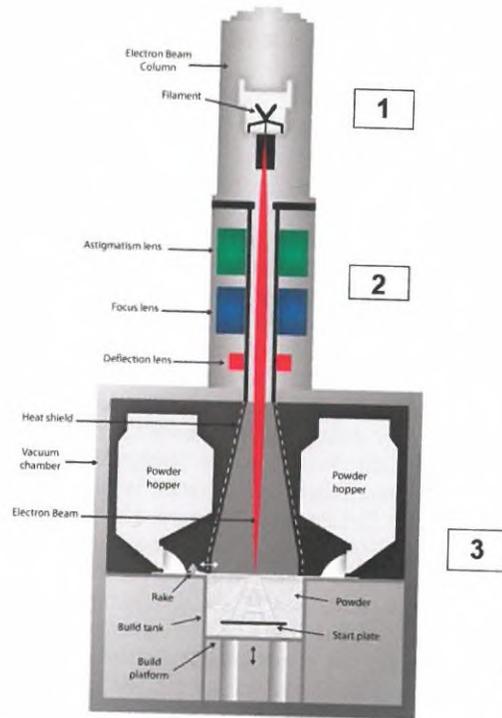


Bild 1: Aufbau einer EBM-Anlage [1]

1.2 Literaturstand - Werkstoffe für die Mobilität mittels EBM Ti-6Al-4V

Vom Anlagenhersteller Arcam sind die Titanwerkstoffe Ti-6Al-4V (Grade 5), Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) und CP-Titan (Grade 2) für die Verarbeitung mittels selektiven Elektronenstrahlschmelzens qualifiziert [1]. Zum Pulver liefert Arcam einen Satz Prozessparameter, für den die mechanischen Eigenschaften des verarbeiteten Materials verifiziert sind. Arcam zielt primär auf Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt und der Medizintechnik ab. Das bislang erfolgreichste kommerzielle Produkt sind Hüftimplantate aus Titan, wovon einige zehntausend Stück unter Nutzung des EBM-Verfahrens hergestellt worden sind. Die erzielbaren Materialqualitäten übertreffen die Anforderungen entsprechender Normen. Für Ti-6Al-4V (Grade 5) werden typischerweise eine Zugfestigkeit von 1020 MPa und eine Bruchdehnung von 14% erreicht. Durch die höhere Abkühlrate ist das Gefüge von EBM-gefertigtem Ti-6Al-4V deutlich feinkörniger als das von gegossenem Material. Heißisostatisch nachverdichtete und mechanisch polierte

Proben sind bei einer Spannung von 600 MPa dauerfest (10^7 Zyklen). Das Gefüge der Titanbauteile ist nahezu isotrop. Die „Extra Low Interstitial“-Variante weist eine noch höhere Bruchdehnung von 16% und höhere Bruchzähigkeit bei verringerter Festigkeit auf. CP-Titan zeichnet sich durch eine weiter erhöhte Korrosionsbeständigkeit, eine hohe Bruchdehnung von 21% und eine Zugfestigkeit von 570 MPa aus.

Insbesondere für Ti-6Al-4V sind der Einfluss der EBM-Prozessparameter auf die Eigenschaften des verarbeiteten Materials in einer Vielzahl von Untersuchungen veröffentlicht und Vergleiche mit SLM-gebautem Material gezogen worden: Murr et al. untersuchen die EBM-Verarbeitung von gasverdünsten Ti-6Al-4V-Pulvern [2]. Es wurden Zugfestigkeiten von bis zu 1200 MPa gemessen. Im Vergleich zu SLM zeichnet sich das EBM-Material durch eine deutlich höhere Duktilität bei leicht verringerter Festigkeit aus. Die mittels EBM erzielten Gefüge lassen sich durch Gießen, Schmieden und Wärmebehandlung nur schwer erreichen, was die near-net-shape-Fertigung von medizinischen Implantaten durch EBM vorteilhaft erscheinen lässt.

Rafi et al. vergleichen im Detail die Struktur von Ti-6Al-4V nach dem EBM-beziehungsweise SLM-Prozess [3]. Der signifikanteste Unterschied besteht im Auftreten von α' -Martensit in SLM-gebautem Material, während EBM-erzeugtes Ti-6Al-4V nur α -Phase mit einem geringen Anteil von β enthält. Der Unterschied wird anhand der unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten und der Temperatur des Pulverbettes diskutiert. Die Dauerfestigkeit des EBM-Materials betrug 340 MPa nach einer mechanischen Oberflächenglättung.

Juechter et al. untersuchten das Parameterfenster aus Strahlleistung und Scangeschwindigkeit, wobei Dichte und chemische Zusammensetzung analysiert wurden [4]. Es wurde eine minimale Linienenergie von circa 200 J/m bestimmt, die für die Herstellung dichter Proben notwendig ist. Dieser Wert ist nur schwach von der Scangeschwindigkeit abhängig. Eine deutliche Abhängigkeit besteht zwischen der Linienenergie und der selektiven Verdampfung einzelner Elemente. Dies betrifft vor allem Aluminium. Mittels hochauflösenden Elementmappings wurden deutliche räumliche Variationen auf der Längenskala einzelner Schichten in der Zusammensetzung identifiziert.

Scharowski et al. beschreiben den Einfluss der Prozessparameter auf die erzielten Gefüge und die mechanischen Eigenschaften von Ti-6Al-4V [5]. Eine Korrelation wird zwischen der Volumenenergie und der Dicke der α -Platten hergestellt. Diese variiert zwischen 0,5 und 2,5 μm . Diese übersetzen sich entsprechend der Hall-Petch-Beziehung in unterschiedliche Festigkeitswerte.

γ -TiAl

Die Verarbeitung verschiedener γ -TiAl-Legierungen mittels EBM wurde untersucht: Ti-48Al-2Cr-2Nb (GE-Legierung, übliche Anwendung Gasturbinen), Ti-48Al-2Nb-0,7Cr-0,3Si (RNT650, übliche Anwendung automobiler Turbolader) und Ti-48Al-2Cr-8Nb. Die Herstellung von TiAl-Turbinenschaufeln mittels EBM hat bei der Firma Avio einen Stand erreicht, dass Testtriebwerke mit additiv hergestellten Teilen ausgerüstet werden können.

Biamino et al. konnten durch EBM und anschließendes heißisostatisches Pressen dichte Proben aus Ti-48Al-2Cr-2Nb herstellen [6]. Durch nachgeschaltete Wärmebehandlungen konnten verschiedene Gefüge, einschließlich eines Duplexgefüges, eingestellt werden. Die Sauerstoffaufnahme im Prozess wird als gering beschrieben, sodass TiAl mit 600 $\mu\text{g/g}$ O hergestellt werden konnte. Der Aluminiumverlust wird mit bis zu 1% quantifiziert. Biamino et al. stellten zudem die Verarbeitung der siliciumhaltigen TiAl-Legierung RNT650 vor [7].

Schwerdtfeger et al. beziffern die kritische Linienenergie zum Bau dichter Proben aus Ti-48Al-2Cr-2Nb auf 700 J/m [8]. In Abhängigkeit von den Scanparametern konnten volllamellare Gefüge mit Koloniegrößen von 10 bis 30 μm erzeugt werden. Bei höheren Scangeschwindigkeiten verschwinden die Lamellen. Turner et al. beschreiben die Verarbeitung einer hoch-niobhaltigen TiAl-Legierung der dritten Generation [9]. Es konnten Prozessparameter gefunden werden, die in einer geringen Porosität, aber 2% Aluminiumverlust resultieren. Neben simplen Testgeometrien wurden auch formkomplexere Turbinenschaufeln aufgebaut.

Ni-Basis

Eine Reihe von Nickelbasislegierungen wurde auf ihre Verarbeitbarkeit mittels EBM und die erzielbaren Werkstoffeigenschaften untersucht: INCONEL 625, INCONEL 718, Rene 142 und CMSX-4. Vordergründige Anwendung dieser Entwicklungen sind hochtemperaturbelastete Teile in Gasturbinen.

Murr et al. fanden in mit EBM verarbeitetem INCONEL 625 kolumnar ausgerichtete γ'' -Ni₃Nb-Ausscheidungen in entsprechend ausgerichteten γ -Ni-Cr-Körnern [10]. Bei einer HIP-Wärmebehandlung lösen sich die Ausscheidungen auf. Dabei kommt es zum Kornwachstum und der Bildung von NbCr₂-Lavesphasen.

Strondl et al. verarbeiteten INCONEL 718 bei 950 °C Vorheiztemperatur [11]. Das entstehende Material besteht aus γ -Körnern mit nahezu identischer Orientierung. Neben groben B1-Ausscheidungen entlang der Kleinwinkelkorngrenzen wurden mit TEM feinste (5 bis 10 nm) γ'' -Ausscheidungen nachgewiesen. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften ergab Festigkeitswerte analog zu konventionell hergestelltem IN718, aber deutlich verringerte Bruchdehnungen in Baurichtung [12]. Dies wird der lokalen Agglomeration von Poren zugeschrie-

ben. Das Prozessfenster für IN718 wurde von Helmer et al. publiziert [13]. Weiterhin wird beschrieben, dass für bestimmte Prozessparameter ein epitaktisches Kristallwachstum auftritt, das zur Bildung von Stengelkristallen führt.

Murr et al. beobachteten bei der EBM-Verarbeitung von Rene 142 ebenfalls die Bildung eines ausgeprägt kolumnaren Gefüges [14]. Die kohärenten γ' -Ausscheidungen waren von würfelförmiger Form mit 275 nm mittlerer Seitenlänge. Das as-built Gefüge ist sehr gut für Anwendungen wie Turbinenschaufeln geeignet, die hohe Kriechfestigkeit erfordern.

Die EBM-Prozessierung der Nickelbasislegierung CMSX-4 wird von Ramsperger et al. beschrieben [15]. Im Ergebnis entsteht ein sehr feinkörniges kolumnares Gefüge mit sehr homogener Elementverteilung. Das erweist sich bei nachfolgenden Wärmebehandlungen als vorteilhaft, da die Refraktärmetalle sehr niedrige Diffusionskoeffizienten aufweisen. So kann die Homogenisierungsglühung mit kurzen Prozesszeiten auskommen.

2. Vom Pulver bis zu Anwendungen in der Mobilität

2.1 Pulverbewertung und -spezifikation

2.1.1 Fallstudie Ti-6Al-4V

Ausgangspunkt ist eine umfassende Charakterisierung des vom Anlagenherstellers Arcam gelieferten Ti-6Al-4V-Pulvers (Tabelle 1). Das Pulver ist durch vergleichsweise grobe Partikel charakterisiert. Primärer Grund ist, dass die feine Pulverfraktion mit Instabilitäten im EBM-Prozess in Verbindung gebracht werden kann [16]. Fließfähigkeit, Füll- und Klopfdichte des Pulvers sind gegenüber analog charakterisierten Pulvern für den SLM-Prozess deutlich erhöht [17]. Aus Klopfdichte und Fülldichte kann ein Hausner-Verhältnis von 1,08 berechnet werden. Dieser Wert liegt weit unter einem als kritisch angesehenen Wert von 1,25 und signalisiert ebenfalls exzellente Fließeigenschaften. Die chemische Zusammensetzung entspricht der ASTM B265 Spezifikation von Titan Grade 5.

Zentrale Punkte für eine Pulverspezifikation für den EBM-Prozess stellen die Grenzen der Partikelgrößenverteilung (beispielsweise 40-120 μm) und die minimale Fließfähigkeit dar. Des Weiteren kann die Spezifikation der chemischen Zusammensetzung prozessspezifische Besonderheiten berücksichtigen. Der Verlust von Aluminium durch Abdampfung kann vorgehalten und die Aufnahme von Sauerstoff bei häufiger Wiederverwendung des Pulvers berücksichtigt werden. Bei Versuchen an recyceltem Pulver wurden keine Veränderung der Fließfähigkeit und ein sehr moderater Anstieg des Sauerstoffgehaltes festgestellt, der im Bereich 0,002%/Durchlauf liegt.

Parameter	Verfahren	Messwert
D ₁₀	Horiba LA950 (ISO 13320)	51.4 µm
D ₅₀		73.2 µm
D ₉₀		107.8 µm
Fließfähigkeit	Hall-Flow, 50 g (DIN ISO 4490)	21.8 s
Füllichte	(DIN ISO 3923/1)	2.59 g/cm ³
Klopfichte	(DIN ISO 3953)	2.81 g/cm ³
Al-Gehalt	Thermo Scientific 6300 DUO ICP-OES	5.75 %
V-Gehalt		3.97 %
Fe-Gehalt		0.21 %
O-Gehalt	LECO TCH 600	0.116 %
N-Gehalt	(DIN ISO 4491)	0.017 %

Tabelle 1: Auswahl der an Arcam Ti-6Al-4V gemessenen Pulvereigenschaften

2.1.2 Neue Methoden der Pulveranalytik für die additive Fertigung

Die Notwendigkeit der Erweiterung der klassischen Pulveranalytik um alternative Methoden liegt in der Tatsache begründet, dass die klassischen Analysemethoden nur unzureichend geeignet sind, um AM-Pulver hinreichend gut zu differenzieren. Beispielsweise stößt die Bestimmung der Durchflussrate mithilfe von Hall-, Gustavsson- und Carney-Trichtern bei feinen, kohäsiven Pulvern, wie sie oftmals im SLM-Prozess Anwendung finden, an ihre Grenzen, da diese Pulver nicht mehr frei durch die Öffnung fließen. Damit ist eine Differenzierung und Bewertung dieser Pulver, deren Fließfähigkeit aber noch ausreichend gut für den SLM-Prozess ist, nicht mehr möglich. Aber auch für Pulver, welche normgerecht durch die Öffnung fließen, ist der Zusammenhang zwischen der Durchflussrate und der Verarbeitbarkeit im pulverbettbasierten Prozess, nicht immer eindeutig [19-21]. Die Ursache für diese mangelhafte Korrelation liegt vor allem darin begründet, dass der Spannungszustand, dem das Pulver im Trichter ausgesetzt ist, sehr weit weg von den Bedingungen während des Pulverauftrages im Prozess entfernt ist. Die Fließfähigkeit ist eine dynamische Eigenschaft des Pulvers unter bestimmten, definierten äußeren Randbedingungen. Es handelt sich nicht um eine universelle Pulverkenngröße, sondern vielmehr um einen Oberbegriff, der die Fähigkeit des Pulvers beschreibt, in einer bestimmten Vorrichtung in einer gewünschten Weise zu fließen [21].

Um die Prozessierbarkeit von Pulvern im additiven Fertigungsprozess verlässlich vorhersagen zu können sind Methoden notwendig, die die tatsächliche Belastungssituation des Pulvers im Pulverbettprozess simulieren. Nach dem derzeitigen Stand der Forschung entwickeln sich zwei Methoden besonders vielverspre-

chend: die dynamische Lawinenmessung und die Bestimmung von pulverrheologischen Kenngrößen.

Die dynamische Lawinenmessung verwendet eine teilweise mit Pulver gefüllte, durchsichtige, rotierende Trommel und zeichnet optisch das Verhalten des Pulvers während der Rotationsbewegung auf. Die so gewonnenen Daten lassen Aussagen zum Fließverhalten, zur Fluidisierbarkeit, Agglomeration, Desagglomeration und zur Packungsdichte zu. Insbesondere die ermittelten Kennwerte zur Fließfähigkeit (avalanche energy, avalanche time, avalanche angle, fractal dimension) scheinen sehr gut mit dem Pulververhalten im Additiven Fertigungsprozess zu korrelieren [20]. Das Messprinzip umgesetzt findet man in einem Gerät mit dem kommerziellen Namen „Revolution Powder Analyser“. Erste Testmessungen wurden an TiAl-Pulvern mit unterschiedlicher Partikelgrößenverteilung, 45-125 µm und 45-150 µm, durchgeführt. Beide Pulverfraktionen wurden im EBM-Prozess eingesetzt. Während sich die engere und feinere Fraktion (45-125 µm) nicht verarbeiten ließ, konnte die gröbere Fraktion (45-150 µm) ohne Probleme verarbeitet werden. Die Ergebnisse der dynamischen Lawinenmessung sind in **Bild 2** dargestellt.

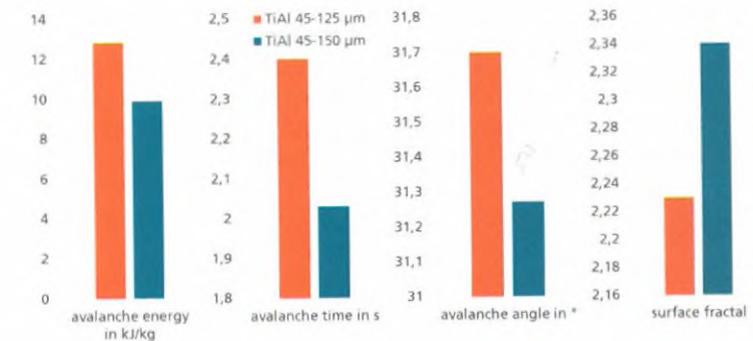


Bild 2: Darstellung von Pulverparametern resultierend aus der dynamischen Lawinenmessung mit dem Revolution Powder Analyser für zwei TiAl-Pulverfraktionen: 45-125 µm und 45-150 µm

Von der Lawinenenergie (avalanche energy), der Dauer zwischen zwei Lawinen (avalanche time), dem Lawinenwinkel (avalanche angle) und der Fraktalen Dimension (surface fractal) wird angenommen, dass sie sich indirekt proportional zur Fließfähigkeit im Prozess verhalten [22]. Dieser Zusammenhang kann für die ersten drei Parameter bestätigt werden. Die fraktale Dimension zeigt ein umgekehrtes Verhältnis, was allerdings auf die größere Partikelgröße in der größeren Pulverfraktion (blauer Balken in **Bild 2**) zurückzuführen ist. Die größeren Pul-

verpartikel bringt eine rauere Pulveroberfläche mit sich, was in der Auswerteroutine zu einer Erhöhung der fraktalen Dimension führt.

Eine weitere Methode zur Charakterisierung von AM-Pulvern stellt die rheologische Untersuchung von Pulvern mittels Pulverrheometer dar. Bei der dynamischen Messung werden zwei Schaufelblätter rotierend abwärts oder aufwärts durch das Pulver bewegt. Gemessen wird die axial wirkende Kraft und das Drehmoment. Aus diesen Kenngrößen wird die benötigte Gesamtenergie für die Schaufelblattbewegung abgeleitet. Die Abwärtsbewegung simuliert einen Fließzustand unter hohen Druckspannungen (Bestimmung des Kennwertes BFE, basic flowability energy in mJ), während die Aufwärtsbewegung das Pulver unter niedrigen Spannungen frei fließen lässt (Bestimmung des Kennwertes SE, specific energy in mJ/g). Es wird angenommen, dass der BFE-Wert von vielen physikalischen Pulver- und Umgebungseigenschaften abhängt, wie beispielsweise der Kohäsivität, Dichte, Morphologie und Partikelgrößenverteilung. Der SE-Wert hingegen beschreibt hauptsächlich die Wechselwirkung in Form von Reibung und Kohäsion zwischen den einzelnen Partikeln. Aufbauend auf diesen zwei unterschiedlichen Belastungszuständen des Pulvers können weitere Werte, wie die Fließratensensitivität (FRI, flow rate index) und die Fließfähigkeitsänderung im Falle von Belüftung und Kompression, bestimmt werden. Die beispielhafte Bestimmung der Parameter BFE und SE an den oben beschriebenen Pulverfraktionen des TiAl-Pulvers zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit der Prozessierbarkeit im EBM-Prozess. Sowohl der BFE- als auch der SE-Wert der feineren TiAl-Fraktion (orangefarbener Balken in **Bild 3**) liegen deutlich über dem der gröberen und besser verarbeitbaren TiAl-Pulverfraktion (blauer Balken in **Bild 3**).

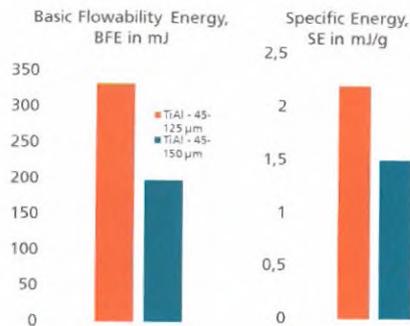


Bild 3: BFE- und SE-Werte gemessen mit dem FT4 Freeman-Rheometer für zwei TiAl-Fraktionen: 45-125 µm und 45-150 µm

Obwohl die Anzahl der dynamischen Untersuchungen an Pulvern für die additive Fertigung (Rheologie und Lawinennmessung) noch gering ist, zeichnet sich eine sehr gute Eignung dieser Analysemethode ab (siehe dazu auch [23]). Weitere Untersuchungen mithilfe dieser Methodik können dazu beitragen, diese zu etablieren und für die routinemäßige Pulvercharakterisierung in der Additiven Fertigung nutzbar zu machen.

2.2 Konstruktionsrichtlinien für EBM

Konstruktionsrichtlinien für additive Fertigungsverfahren zählen mit zu den wichtigsten Forderungen für die Etablierung der Technologie in der industriellen Anwendung. Für die Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für additive Fertigungsverfahren ist zu beachten, welche prozessspezifischen Eigenheiten Einfluss auf das Ergebnis haben. Im Bereich der laseradditiven Fertigung sind in den letzten Jahren verschiedene Anläufe unternommen worden, Aussagen zu fertigungsbaren Geometrien zu treffen [24-26]. Viele der Ergebnisse dieser Arbeiten zeigen, dass die Aussagen zu herstellbaren Geometrien stark prozess-, material- und anlagenherstellerspezifisch sind. Im Bereich des selektiven EBM gab es bislang keine umfassenden Untersuchungen zu herstellbaren Geometrien.

Bei der Untersuchung bestimmter anderer Verfahrenseigenheiten wie Mikrostruktur und Festigkeit des Ti6Al4V für EBM sind folgende Aussagen zu erreichbaren Geometrien festgehalten worden [27, 28]:

- Der minimale Zylinderdurchmesser in Fertigungsrichtung beträgt beim EBM 0,6 mm
- Überhänge lassen sich parallel zur Bauebene bis zu einer Länge von 8 mm verzugsfrei fertigen
- Geometrieabweichungen bei unterschiedlichen Winkeln zur Bauebene

Folglich wurde zum Ziel gesetzt, umfassende Aussagen zu geometrischen Möglichkeiten für das EBM zu entwickeln. Dafür wurden mehrere Demonstratoren aufgebaut und mittels bildgebender und optischer Messverfahren aufgenommen und mit dem CAD-Modell verglichen. Zur Auswertung von kleinen Geometrien und zur Einordnung der dimensional Möglichkeiten des Verfahrens ist ein frei verfügbarer Demonstrator des Rapid Technology Center der Universität Duisburg-Essen verwendet worden. Zur genaueren Beschreibung der Durchführung zur Ermittlung der Ergebnisse sei auf entsprechende Literatur verwiesen [29].

Neben den Aussagen zu kleinen Geometrien sind die Abweichungen des EBM-Prozesses innerhalb der gesamten Baukammer untersucht worden. Hierfür ist ein Demonstrator entwickelt worden, welcher den Bauraum einer Arcam A2X-Anlage mit 200 x 200 x 380 mm nahezu vollständig ausfüllt. Die Abweichungen innerhalb des Bauraums können dadurch bestimmt werden. Das Ergebnis dieser Untersuchung liefern eine Abweichung über den gesamten Bauraum von bis zu 2 mm. Zusammenfassend mit den Erkenntnissen zu kleinen Geometrien lässt sich

das EBM-Verfahren bzw. die Arcam A2X-Anlage in die ISO-Grundtoleranzklasse IT15 nach DIN ISO 286 einordnen.

Die Ergebnisse, welche im Zuge der Ermittlung von Konstruktionsrichtlinien für das EBM am Fraunhofer IFAM entstanden sind, wurden aufgrund ihrer Neuheit und der Forderung nach industriellen Richtlinien nach Abstimmung mit entsprechenden Experten aus dem Fachausschuss des VDI 105.3 zum Großteil direkt in die Richtlinie VDI 3405 Blatt 3.5 „Konstruktionsrichtlinien für das Elektronenstrahlschmelzen“ übernommen.

3. EBM-Prozess: Werkstoffe und Bauteile

3.1 Prozessentwicklung

Sowohl für bereits qualifizierte, aber insbesondere für im EBM-Verfahren noch nicht verarbeitete Werkstoffe sind Untersuchungen zu Eigenschaften in Abhängigkeit von den verwendeten Prozessparametern notwendig. Im ersten Schritt sollen die Proben eine möglichst hohe Dichte (>99%) und eine möglichst niedrige interne Defektdichte aufweisen. Nachfolgende Schritte beinhalten beispielsweise die Herstellung von Testmustern bei unterschiedlichen Parametern für weiterführende Analysen (z.B. Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften). Diese Schritte werden nachfolgend für verschiedene Werkstoffe beschrieben.

3.1.1 Ti-6Al-4V

Es handelt sich hier zwar um einen seitens des Anlagenherstellers Arcam qualifizierten Werkstoff, aber es wird üblicherweise nur ein Satz von Prozessparametern zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen einer Studie ein Prozessfenster erstellt.

Das Pulver in der nominellen Fraktion 45-105 μm wurde vom Anlagenhersteller bezogen. Auf einer A2X-Anlage wurden pro Baujob 10 quaderförmige Proben ($50 \times 10 \times 14 \text{ mm}^3$) aufgebaut. Variiert wurden die Prozessparameter Strahlstrom und Scangeschwindigkeit. Die verwendeten Prozessparameter und deren Bereiche sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

Parameter	variiert/konstant	Variationsbereich/Festwert
Vorheiztemperatur	konstant	700-750 °C
Schichtdicke	konstant	50 μm
Beschleunigungsspannung	konstant	60 kV
Strahlstrom	variiert	3-24 mA
Scangeschwindigkeit	variiert	500-16 000 mm/s
Hatch-Abstand	konstant	100 μm
Focus Offset	konstant	3 mA

Tabelle 2: Prozessparameter für die Erstellung des Prozessfensters von Ti-6Al-4V

In **Bild 4** ist beispielhaft eine Probenserie mit 24 mA Strahlstrom zu sehen, in der die Scangeschwindigkeit zwischen 4 und 16 m/s variiert wurde.

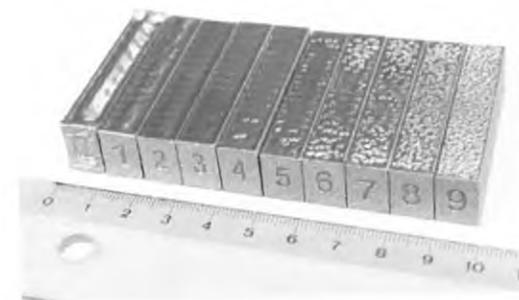


Bild 4: Probenserie EBM (Werkstoff Ti-6Al-4V)

Visuell lassen sich an den Probenoberflächen im Wesentlichen drei Qualitäten unterscheiden:

- Bei den niedrigsten Scangeschwindigkeiten (Proben 0 und 1) sind Aufwüchse auf der Oberfläche zu beobachten. Eine mögliche Erklärung dieses Schwelleneffektes ist die Überhitzung des gebauten Materials, wodurch beim Rakelschritt zu viel Pulver haften bleibt.
- Für mittlere Scangeschwindigkeiten (Proben 2-4) ist die Oberfläche im Wesentlichen eben.
- Für die höchsten Scangeschwindigkeiten (Proben 5-9) ist zunehmend Porosität an der Probenoberfläche sichtbar. Dies ist ein klares Indiz dafür, dass die eingebrachte Energie für eine vollständige Verdichtung nicht mehr ausreicht.

chend ist. In diesem Fall sind auch interne Baufehler in Form von Porosität zu erwarten.

Die Messung der Dichte nach der Auftriebsmethode in **Bild 5** verdeutlicht diesen Trend. Auch hier sind drei Bereiche unterscheidbar:

- Zwischen 6-10 m/s (Proben 1-5) ist die Dichte im Bereich der theoretischen Dichte für den Werkstoff ($4,43 \text{ g/cm}^3$), was einer vollständigen Verdichtung im Prozess entspricht.
- Für 4 m/s (Probe 0) ist die Dichte im Vergleich zum theoretischen Wert leicht erhöht. Hier kommt es auf Grund des hohen Energieeintrags zu einer selektiven Verdampfung des leichten Elementes Aluminium.
- Für Scangeschwindigkeiten $> 10 \text{ m/s}$ ist ein signifikanter Abfall der Dichte bestimmt worden. Dies ist ein weiterer Hinweis sowohl auf externe als auch interne Porosität in Folge eines zu geringen Energieeintrags.

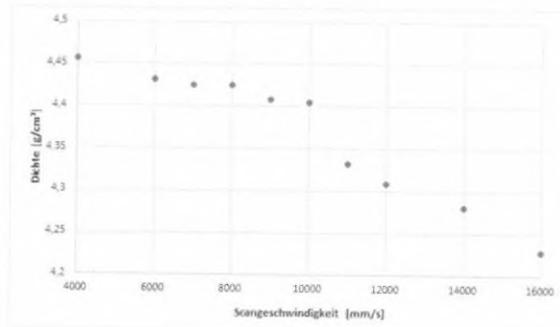


Bild 5: Dichtewerte für Probenserie (Ti-6Al-4V), Strahlstrom 24 mA

Die Auftragung der Bauteilqualitäten in Abhängigkeit von Strahlstrom und Scangeschwindigkeit erfolgt als Prozessfenster in **Bild 6**. Durch die Definition der Linienenergie als Quotient von Strahlleistung und Scangeschwindigkeit sind drei Bereiche leicht unterscheidbar. Zwischen 100 und 300 J/m sind dichte und intern defektfreie Proben herstellbar. Diese Daten dienen als Grundlage einerseits für das verbesserte Verständnis zwischen Eigenschaften und Prozess: beispielsweise sind die Mikrostruktur und damit z.B. mechanische Eigenschaften abhängig von den Prozessparametern. Andererseits kann eine Prozessoptimierung, z.B. in Bezug auf die Baurate, vorgenommen werden.

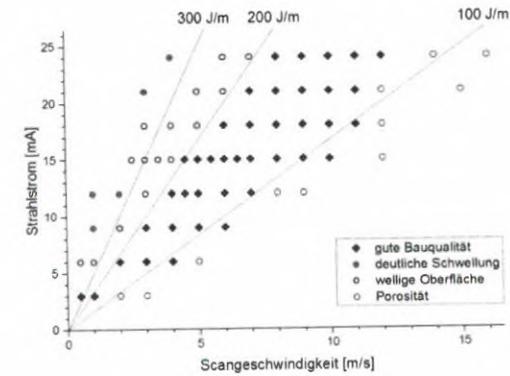


Bild 6: Prozessfenster Ti-6Al-4V

Mit dem Standardparametersatz wurden Rohlinge für genormte Zugproben aufgebaut [18]. Diese wurden größtenteils heißisostatisch gepresst und verschiedenen Wärmebehandlungen zwischen 650 °C und 1050 °C unterzogen. Der signifikanteste Effekt der Wärmebehandlungen auf die statischen Eigenschaften besteht in einer Erhöhung der Bruchdehnung von circa 10% auf 16% (**Bild 7**). Die Zugfestigkeit wird, von der höchsten Glühtemperatur abgesehen, wenig verändert.

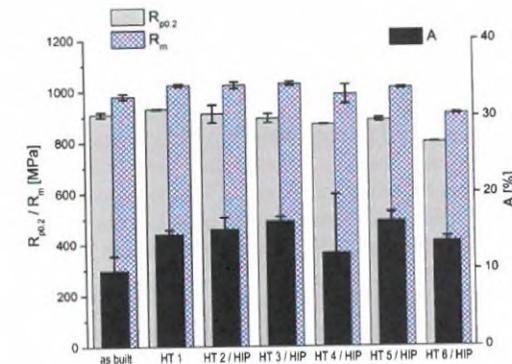


Bild 7: Zugfestigkeit R_m , Streckgrenze $R_{p0.2}$ und Bruchdehnung A der wärmebehandelten Ti-6Al-4V-EBM-Proben

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind in Form von S-N-Kurven in **Bild 8** dargestellt. Die Rohlinge wurden in z-Richtung aufgebaut, sodass die Belastungsrichtung in Aufbaurichtung ist. Daraus wurden die Testproben nach EN

6072 (Typ 1) herauspräpariert (Länge 90 mm, Höhe 2,5 mm, minimale Dicke 7 mm). Die Versuche wurden bei einem Spannungsverhältnis von 0,1 und Frequenzen von 88 bis 146 Hz durchgeführt. Sofern die Zyklenzahl größer als 2×10^7 war, wurde der Test abgebrochen (run-out). Die Dauerfestigkeit im oberflächengeglätteten as-built Zustand beträgt circa 350 MPa. Durch HIP und geeignete Wärmebehandlung kann sie auf über 600 MPa gesteigert werden.

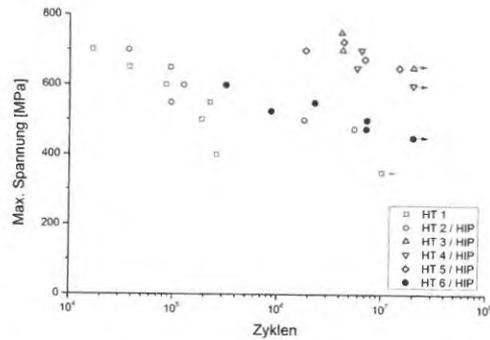


Bild 8: Ermüdungsverhalten der wärmebehandelten Ti-6Al-4V-EBM-Proben. Datenpunkte mit Pfeilen markieren Durchläufer

3.1.2 Titanaluminid

Diese Klasse von Werkstoffen ist die derzeit herausforderndste für das EBM-Verfahren. Die Gründe dafür sind, dass aufgrund der ähnlich geringen Dichte wie für Ti-6Al-4V einerseits die Tendenz zum Pulververblasen („smoke“) sehr ausgeprägt ist. Andererseits werden sehr hohe Temperaturen (üblicherweise $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) benötigt, um mittels Vorheizen das Verblasen des Pulvers zuverlässig zu vermeiden. Dazu kommt, dass während des Schmelzschritts das Pulverbett abkühlt, sodass neben dem eigentlichen Vorheizen weitere Zwischen- und Nachheizschritte notwendig sind.

Im Folgenden soll anhand der Legierung RNT650 lediglich auf die Prozessentwicklung des Vorheizens eingegangen werden, da dieser Schritt aufgrund der genannten Herausforderungen am aufwendigsten ist [30]. Anhand von Temperaturmessungen werden die Entwicklungsschritte beschrieben und erklärt. In der Maschine wird die Temperatur mittels Thermoelementen an zwei Stellen gemessen: (i) unterhalb der Startplatte (T_S) und innerhalb der Elektronenstrahlsäule (T_C). Letztere Messung ist eine Sicherheitsmaßnahme, um die Maschine beim Überschreiten von $80 \text{ }^\circ\text{C}$ abzuschalten, da ansonsten das Linsensystem Schaden nehmen würde. Diese Abschaltung passiert insbesondere bei einem „smoke“-Ereignis, da Pulver durch das Verblasen unter anderem in die Elektronen-

strahlsäule gesaugt und durch den Elektronenstrahl sofort massiv erwärmt wird, was zu einer sofortigen massiven Erwärmung führt. Deswegen ist ein „smoke“ durch einen entsprechenden peak bei T_C deutlich zu erkennen. In den **Bildern 9 bis 11** sind die Temperaturverläufe für verschiedene typische Baujobs gezeigt. Dabei kennzeichnet der Pfeil den Beginn des Aufbauprozesses; der Bereich links davon ist der Schritt des Aufheizens der Startplatte.

In **Bild 9** sind die Temperaturverläufe für einen Baujob gezeigt, der sehr kurz nach dem Start durch einen „smoke“ abgebrochen ist. Sofort nach Beginn des Aufbauprozesses ist bei T_S ein starker Abfall zu beobachten. Dies deutet auf eine zu geringe Dauer der Heizschritte hin, sodass der nächste Entwicklungsschritt in der Verlängerung dieses Schrittes besteht.

In **Bild 10** ist bei T_S kein wesentlicher Abfall mehr zu erkennen. Jedoch treten bei T_C zuerst vier kleinere „smokes“ auf, bevor der fünfte zum Abbruch des Baujobs führt. Dieser Verlauf deutet darauf hin, dass die Temperaturverteilung noch nicht homogen genug ist und weitere Anpassungen in Dauer der einzelnen Heizschritte notwendig sind.

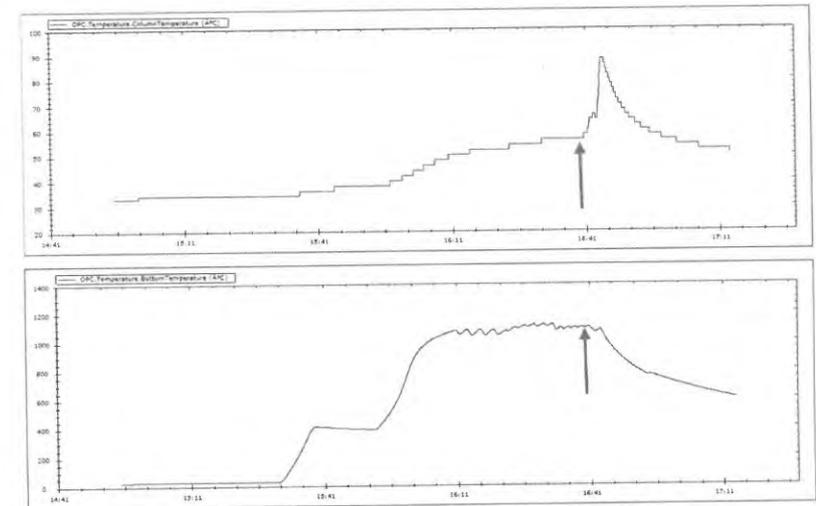


Bild 9: Temperaturen T_C (oben) und T_S (unten) für Baujob mit frühem „smoke“

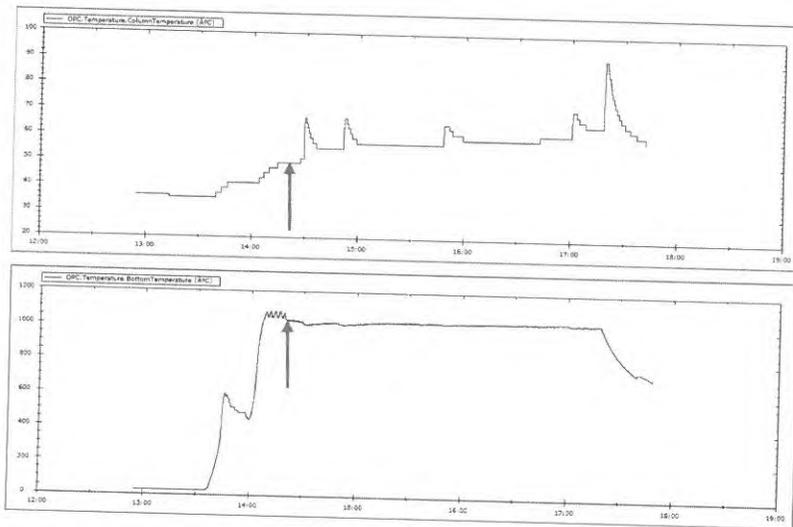


Bild 10: Temperaturen T_C (oben) und T_S (unten) für Baujob mit mehreren „smokes“

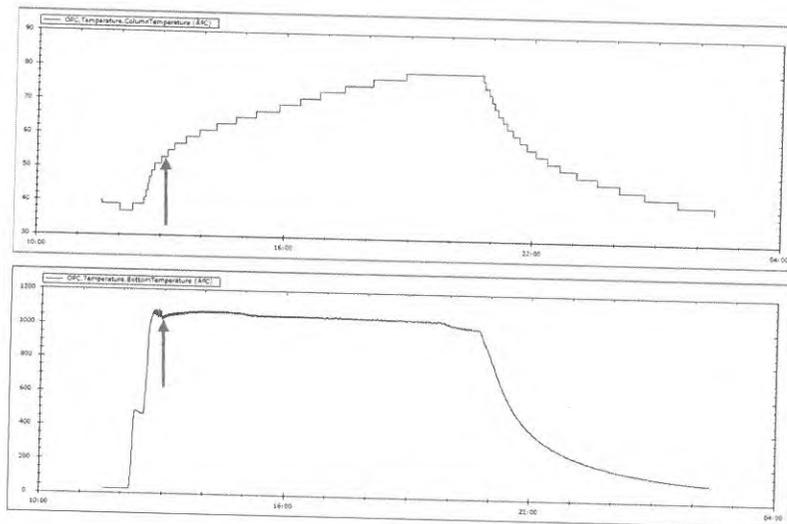


Bild 11: Temperaturen T_C (oben) und T_S (unten) für Baujob ohne „smoke“

In **Bild 11** sind die Temperaturverläufe für einen erfolgreich abgeschlossenen Baujob gezeigt. Hier ist auffällig, dass die Temperatur T_C sich ebenfalls der Abschaltswelle nähert und nach dem Anstieg über einen langen Bereich nur knapp unterhalb verbleibt. Der Grund ist die Wärmestrahlung infolge des sehr langen Heizschritts.

Es zeigte sich damit, dass eine erfolgreiche Verarbeitung des Werkstoffs RNT650 möglich, aber das Prozessfenster in Bezug auf die Temperatur sehr eng ist.

3.2 Bauteile

3.2.1 Main Gear Bracket

Als Beispiel für den in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Ablauf der Strukturoptimierung wird im Folgenden ein Beispiel für eine Strukturoptimierung beschrieben, welche für eine Getriebehalterung des Hauptrotorgetriebes eines Helikopters - dem Main Gear Bracket (MGB) - durchgeführt wurde. Die Ziele für die Optimierung des Bauteils wurden wie folgt definiert:

- Signifikante Massereduktion im Vergleich zur bisherigen Baugruppe
- Zusammenführung der bestehenden Baugruppe zu einem Bauteil
- Fertigungsgerechte Gestaltung für das EBM
- Nutzung gegebener Montage- und Anbindungsgeometrien
- Berücksichtigung aller statischen und dynamischen Lastfälle und Vermeidung einer Überlast an den Anbindungspunkten des Bauteils

Die bisherige Baugruppe besteht aus zwei Einzelteilen - dem sogenannten Upper Bracket aus Stahl und dem Counter Bracket aus Ti6Al4V - die miteinander über vier Schrauben verbunden sind, wie in **Bild 12** dargestellt. Über das Lager im Upper Bracket werden die Lasten auf das Counter Bracket und über 20 Nieten in die umliegende Struktur eingeleitet.

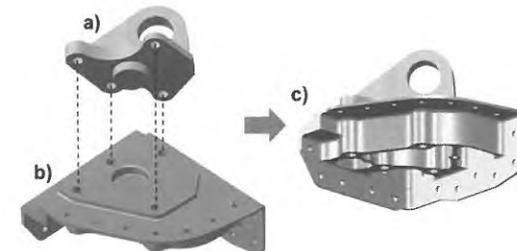


Bild 12: a) Upper Bracket, b) Counter Bracket und das c) Main Gearbox Bracket

Die Prozesskette für die Optimierung der Getriebehalterung ist in **Bild 13** dargestellt. Im Folgenden werden die Teilschritte dieser Prozesskette erläutert und Einflüsse in Bezug auf das Fertigungsverfahren im Gegensatz zur konventionellen Fertigung dargestellt.

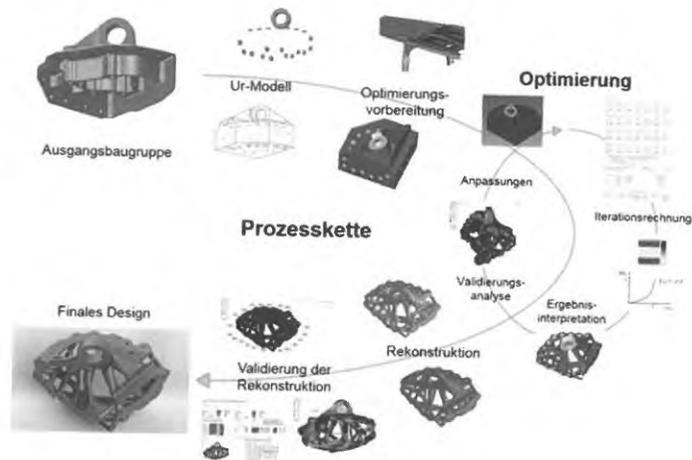


Bild 13: Prozesskette des Optimierungsproblems

Im ersten Schritt wird aus der Ausgangsbaugruppe ein zur Verfügung stehender Optimierungsraum extrahiert, im Folgenden Ur-Modell genannt. In diesem Ur-Modell werden neben dem Designraum auch die Anschlussmaße und -geometrien zu umgebenden Strukturen inklusive Montagegegebenheiten berücksichtigt. Im vorliegenden Fall wird für die Montage ausschließlich der Freiraum für die Nieten, um diese in das Loch zu führen, berücksichtigt. Das Ur-Modell als Drahtgittermodell zur Veranschaulichung zeigt dies in **Bild 14**.

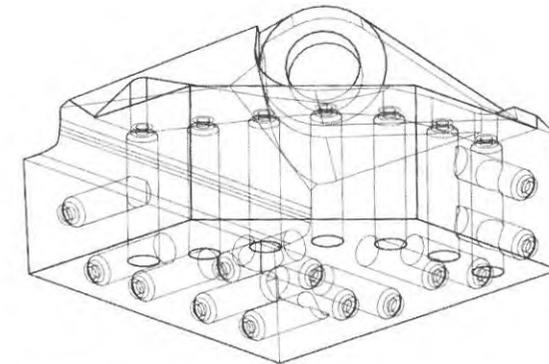


Bild 14: Drahtgittermodell des Ur-Modells

Es folgt die Modellaufbereitung. Dabei wird das Ur-Modell in der Simulationsumgebung für die Analyse und Optimierung vorbereitet. Dies umfasst das Auswählen von veränderlichen und nicht veränderlichen Designbereichen sowie das Umwandeln des Bauteilvolumens in FE für die Berechnung. Das Modell wird danach um 1-dimensionale Elemente ergänzt. An diesen werden die Lasten und Einspannungen definiert. Zusätzlich werden die Nieten durch 2D-Balkenelemente ersetzt, um den Berechnungsumfang zu reduzieren. Nach der Modellaufbereitung werden die Optimierungsparameter definiert. Neben dem Optimierungsziel - der Massereduktion - werden Randbedingungen festgelegt. Beispielfhaft seien hierbei das minimal zur Verfügung stehende Volumen, die maximal ertragbaren Spannungen bei entsprechenden Lastfällen und die minimalen Strukturgrößen zur Gewährleistung der Montagezugänglichkeiten genannt. Die Optimierungssoftware errechnet anhand dieser Vorgaben in mehreren Iterationsschleifen eine Lösung für das Optimierungsproblem. Diese Ergebnisse werden interpretiert und mit den zugrundeliegenden Vorgaben verglichen. Mitunter sind Optimierungsparameter zu präzisieren, sollte die Lösung keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern.

Das Ergebnis muss für die Fertigung aufbereitet werden. Dafür lässt sich typischerweise nicht direkt der Optimierungsentwurf verwenden. Gründe dafür sind im speziellen:

- Die rauen Oberflächen durch die Umwandlung in finite Elemente
- Fehlerhafte und unveränderliche Datenformate bei der automatischen Überführung von Simulations- zu CAD-Umgebungen
- Deformierte und dimensional nicht fertigbare Strukturen
- Bewusste Änderungen im Design aufgrund von Fertigungsverfahrenvereinfachungen und Materialzugabe für notwendige Nachbearbeitungsschritte.

Für die Rekonstruktion des Optimierungsergebnisses sind konventionelle, auf Booleschen Operationen basierende Programme verwendet worden. Auf Basis des Ergebnisses wurden die Strukturen nachkonstruiert. Eine präzise Beschreibung der Rekonstruktion ist in [29] beschrieben. Abschließend wird das geänderte Modell final für die entsprechenden Lastfälle simuliert. Werden alle Anforderungen erfüllt, wird das Modell für die additive Fertigung vorbereitet. Nach Erstellung der fertigen STL-Datei, Festlegen der Baurichtung, der Positionierung im Bauraum und Anbringen von Supportstruktur an kritischen Geometrien wurde ein Demonstrator im Maßstab 1:2 gefertigt, welcher in **Bild 15** dargestellt ist.

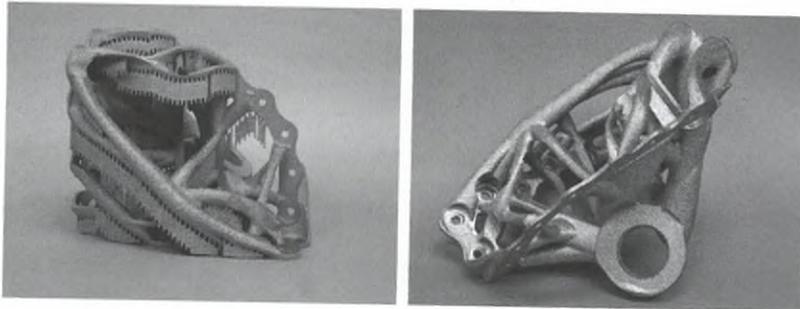


Bild 15: Demonstrator des Main Gearbox Bracket, links: „as-built“, rechts: endbearbeiteter Zustand

Unter Anbetracht dessen, dass die bisherige Baugruppe bereits für die konventionelle Fertigung optimiert wurde, ist mit der Reduktion der Masse um mehr als 40% im Zuge dieser Arbeit nochmals eine signifikante Steigerung erreicht worden.

Nach veränderten Vorgaben an der Ausgangsbaugruppe des Projektpartners wurde ein zweiter Entwurf des MGB erstellt. Hierfür wurde die Rekonstruktionsstrategie abgeändert, um durch Verringerung des Aufwandes die Effizienz zu steigern. Ausgangspunkt dafür ist das für additive Fertigung genutzte *.stl-Format. Diese Beschreibungsform der Oberfläche ähnelt der FE-Oberfläche der Optimierung. Durch diese Tatsache und die Möglichkeit, diese unregelmäßigen und nicht parametrisierten Strukturen zu fertigen, wird die Übergabe des Optimierungsentwurfs und weiterführend die Änderung des Entwurfes ohne eine neue Konstruktion begünstigt. Für detailliertere Beschreibung dieser und weiterer Rekonstruktionsmethoden sei ebenfalls auf weitere Literatur verwiesen [29, 31].

Von diesem Bauteil wurden mehrere Exemplare durch selektives Elektronenstrahlschmelzen in Ti-6Al-4V gefertigt, wobei iterativ der Support an kritischen Stellen optimiert wurde. Wichtig ist es, schon an dieser Stelle genügend Aufmaß

für Nachbearbeitung und Oberflächenglättung einzuplanen sowie Strategien zum Spannen und Einmessen der Bauteile beim Fräsen zu entwickeln. Die Bauteile wurden zunächst heißisostatisch gepresst und wärmebehandelt. Die Oberflächenglättung erfolgte danach durch elektrolytisches Polieren. Im letzten Schritt wurden die Bauteile durch Fräsen endbearbeitet. **Bild 16** zeigt das MGB im as-built und endbearbeitenden Zustand.

Drei Exemplare wurden beim Projektpartner auf dem Teststand für Serienteile einem realistischen Testprogramm unterworfen. Danach konnte die vorhergesagte Lebensdauer bestätigt werden.

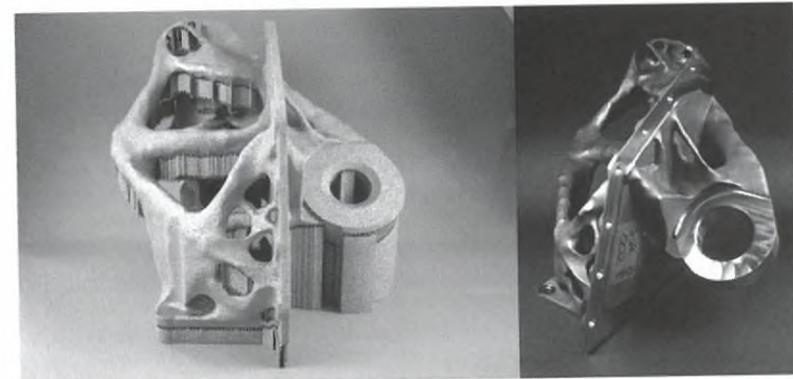


Bild 16: Main Gearbox Bracket im „as-built“ (links) und endbearbeitetem Zustand (rechts)

3.2.3 Turboladerrad

Aus dem Werkstoff RNT 650 wurden nach erfolgter Prozessentwicklung (Kapitel 3.1.2) mehr als 30 Demonstratoren hergestellt (**Bild 17**). Zuerst musste eine passende Anordnung der Proben gefunden werden. Nachdem diese erfolgreich mit einzelnen Demonstratoren getestet wurde, erfolgte eine Erweiterung auf zwei Lagen bei gleicher Anordnung. Auch dieser Baujob wurde erfolgreich durchgeführt. Durch Untersuchungen der Mikrostruktur und Dichtemessungen wurde nachgewiesen, dass die Bauteile sowohl dicht als auch defektfrei sind. Modifikationen der Mikrostruktur durch Wärmebehandlungen, die für TiAl unerlässlich sind, werden in [32] beschrieben.

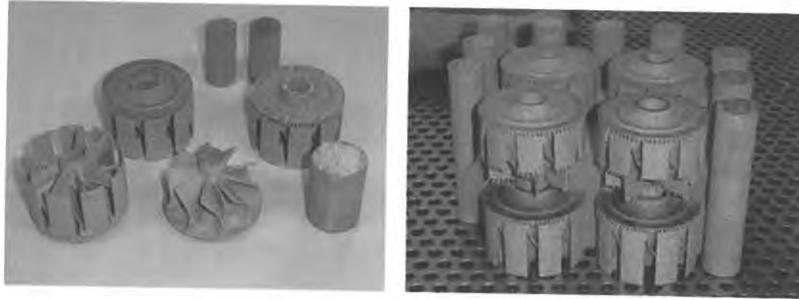


Bild 17: Demonstratoren aus TiAl (RNT 650): einzeln, mit und ohne Stützstrukturen (links), gestapelt (2 Lagen) mit Stützstrukturen (rechts)

In einem weiteren Schritt wurde nach entsprechender Auslegung geprüft, ob sich auch Demonstratoren mit einem inneren Hohlraum fertigen lassen, aus welchem nach der Fertigung das Überschusspulver entfernt werden muss. Dadurch werden eine weitere Gewichtsersparnis und ein besseres Ansprechverhalten ermöglicht. Eine Serie von vier Turboladerrädern wurde erfolgreich hergestellt und das Überschusspulver mechanisch und mittels Ultraschall entfernt. Das Modell, ein Schnitt durch einen Demonstrator und der Vergleich mit einem Vollbauteil sind in **Bild 18** abgebildet.

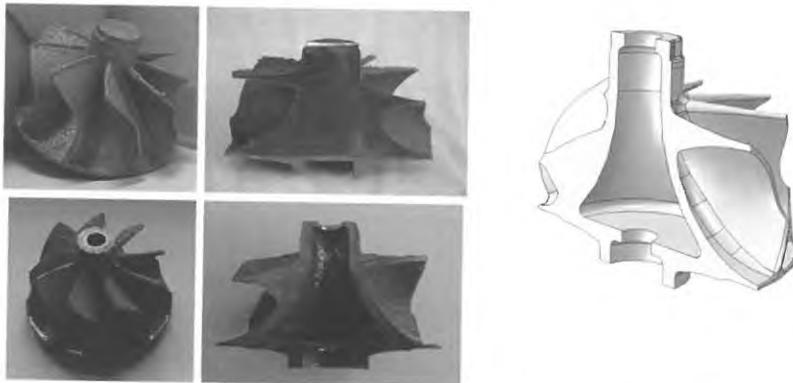


Bild 18: Vergleich zwischen Demonstrator mit und ohne Hohlraum sowie Modell [32]

Literatur

- [1] <http://www.arcam.com>
- [2] *Murr, LE et al:* Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications, *J Mech Behav Biomed* 2 (2009) 20-32.
- [3] *Rafi, HK et al:* Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting, *J Mater Eng Perform* 22 (2013) 3872-3883.
- [4] *Juechter, V. et al:* Processing window and evaporation phenomena for Ti-6Al-4V produced by selective electron beam melting, *Acta Mater* 76 (2014) 252-258.
- [5] *Scharowsky, T. et al:* Influence of the scanning strategy on the microstructure and mechanical properties in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V, *Adv Eng Mater* (2015), 1573 - 1578
- [6] *Biamino, S. et al:* Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation, *Intermetallics* 19 (2011) 776-781.
- [7] *Biamino, S. et al:* Titanium aluminides for automotive applications processed by electron beam melting, *World PM2014 Proc* 03-96 – 03-103.
- [8] *Schwerdtfeger, J. et al:* Selective electron beam melting of Ti-48Al-2Nb-2Cr: Microstructure and aluminium loss, *Intermetallics* 49 (2014) 29-35.
- [9] *Terner, M. et al:* Electron beam melting of high niobium containing TiAl alloy: Feasibility investigation, *Steel Res Int* 83 (2012) 943-949.
- [10] *Murr, LE et al:* Microstructural architecture, microstructures, and mechanical properties for a nickel-base superalloy fabricated by electron beam melting, *Metall Mater Trans A* 42 (2011) 3491-3508.
- [11] *Strondl, A. et al:* Investigations of MX and γ'/γ'' precipitates in the nickel-based superalloy 718 produced by electron beam melting, *Mater Sci Eng A* 480 (2008) 138-147.
- [12] *Strondl, A. et al:* Microstructure and mechanical properties of nickel based superalloy IN718 produced by rapid prototyping with electron beam melting, *Mater Sci Tech* 27 (2011) 876-883.
- [13] *Helmer, HE et al:* Additive manufacturing of nickel-based superalloy Inconel 718 by selective electron beam melting: Processing window and microstructure, *J Mater Res* 29 (2014) 1987-1996.
- [14] *Murr, LE et al:* Microstructures of Rene 142 nickel-based superalloy fabricated by electron beam melting, *Acta Mater* 61 (2013) 4289-4296.
- [15] *Ramsperger, M. et al:* Solution heat treatment of the single crystal nickel-base superalloy CMSX-4 fabricated by selective electron beam melting, *Adv Eng Mater* (2015) 10.1002/adem.201500037.
- [16] *Körner, C.:* Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - a review, *Inter Mater Rev* (2016) 1-17.
- [17] *Kirchner, A. et al:* Powders for additive manufacturing, *Proc World PM* (2016). ISBN 978-1-899072-48-4

- [18] *Kirchner, A. et al*: Mechanical properties of Ti-6Al-4V additively manufactured by electron beam melting, Proc Euro PM (2015).
- [19] *Clayton, J.*: Characterizing powders to optimise additive manufacturing. Online verfügbar unter: [http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/characterising-powders-to-optimise-additive-manufacturing/_\(2014\)](http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/characterising-powders-to-optimise-additive-manufacturing/_(2014))
- [20] *Spierings, A. B. et al.*: Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing. In: Progress in Additive Manufacturing, S. 1–12. (2015)
- [21] *Schulze, D.*: Powders and bulk solids. Behavior, characterization, storage and flow. Berlin, New York: Springer (2008)
- [22] *Soh, J. L. P. et al*: New indices to characterize powder flow based on their avalanching behavior. In: Pharmaceutical development and technology 11 (1), 2006, S. 93–102.
- [23] *Lutter-Günther, M. et al*: Einfluss der Korngrößenverteilung auf Fließfähigkeit und Bauteilqualität beim Laserstrahlschmelzen. Influence of Particle Size Distribution on Powder Flowability and Part Properties in Laser Beam Melting. In: M. Kynast, M. Eichmann und G. Witt (Hg.): Proceedings of the 14th Rapid.Tech Conference (2017)
- [24] *Adam, G. A.; Zimmer, D.*: Design for Additive Manufacturing - Element transitions and aggregated structures. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7 (2014) 1, S. 20–28.
- [25] *Sempari, M. T.*: Development of Design Guidelines for Metal Additive Manufacturing and Process Selection. Pennsylvania State University, 2014.
- [26] *Kranz, J et al.*: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4, Journal of Laser Applications 27 (2015), 14001
- [27] *Vayre, B. et al.*: Identification on Some Design Key Parameters for Additive Manufacturing: Application on Electron Beam Melting. In: Procedia CIRP 7 (2013).
- [28] *Suard, M.*: Characterization and Optimization of Lattice Structures made by Electron Beam Melting. Université de Grenoble, 2015
- [29] *Süß, M. et al.*: Aerospace Case Study on Topology Optimization for Additive Manufacturing; Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2016; Conference Proceedings; ISBN: 978-3-8396-1001-5
- [30] *Klöden, B. et al.*: Processing Specifics in Electron Beam Melting of TiAl, Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2016; Conference Proceedings; ISBN: 978-3-8396-1001-5
- [31] *Süß, M. et al*: Effiziente Rekonstruktion topologieoptimierter Daten im CAE/CAM-Prozess, Rapid.Tech – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing, Erfurt, 2017
- [32] *Baudana, G. et al.*: Electron beam melting of Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si: feasibility investigation, Intermetallics 73 (2016), 43 - 49